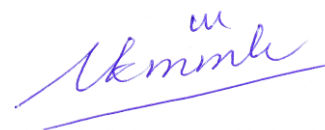


На правах рукописи



ЧАН ХОАНГ КУАНГ МИНЬ

**КРИТЕРИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ВЫБОРА
УСТАВОК И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НАСТРОЙКИ ДИСТАНЦИОННЫХ
ЗАЩИТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Шмойлов Анатолий Васильевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Хрущёв Юрий Васильевич
доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор кафедры электрических сетей и электро-техники

Никитин Константин Иванович
кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, профессор кафедры электро-снабжения промышленных предприятий

Ведущая организация:

Институт автоматизации энергетических систем

Защита состоится « 26 » декабря 2012 г. в 14-00 часов в на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « 21 » ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.10, д.т.н., с.н.с.



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современных средствах релейной защиты (РЗ) электрических сетей благодаря найденным метрологическим достижениям (торможение от токов, конфигурация характеристик срабатывания в комплексной плоскости сопротивления, компенсация падений напряжений обратной и нулевой последовательности на линиях) и схемотехническим решениям практически полностью (дифференциальные защиты) или частично (дистанционные РЗ) исключены потери функционирования в виде отказов срабатывания, излишних и ложных действий. Для РЗ с обменом информацией о срабатывании между комплектами РЗ на концах линий, по принципу действия являющихся распространением дифференциального принципа на распределенные в пространстве линии, также достигнуты подобные показатели.

Однако остается количественно не меньший класс ступенчатых токовых и дистанционных РЗ (в первую очередь линий), в которых свойство несрабатывания при внешних КЗ достигается временной системой блокирования ступеней, по принципу действия имеют место неустраняемые потери функционирования РЗ: отказы срабатывания и излишние действия, зависящие от режимно-коммутационного состояния сети, видов КЗ, помех, что обобщенно выражается как зависимость от выбранных уставок. Хотя в современных ступенчатых РЗ ответственных объектов предусмотрен канал обмена о срабатывании комплектов РЗ на концах линии и тем самым решена проблема о быстродействующем срабатывании при КЗ на всем пространстве защищаемых линий, остаются вопросы выбора уставок и расчетов потерь вторых (третьих) и резервирующих ступеней, которые целесообразны к осмыслению и решению в современной инновационной форме. Кроме того подавляющая часть ступенчатых РЗ линий разных категорий ответственности выполняют функции основных и резервирующих защит без каналов обмена между комплектами РЗ на концах линий. Оборудование РЗ каналами обмена данными линий экономически невыгодно, но поиск и внедрение решений, снижающих потери и повышающих эффективность функционирования целесообразны и необходимы. Актуальность данного вопроса в настоящее время возрастает в связи с тем, что разработан большой арсенал электромеханических, микроэлектронных и особенно микропроцессорных РЗ, приблизительно одинаковых по своим потребительским качествам, однако нет однозначно объективного расчетного критерия качества для практического применения при выборе РЗ для каждого защищаемого объекта как элемента сети.

Согласно статистике, причиной значительного числа тяжелых аварий и их развития в электроэнергетических системах (ЭЭС) (по разным оценкам не менее 25 %) служат неправильные действия релейной защиты и автоматики (РЗА), обусловленные использованием при их проектировании и настройке неполной и недостаточно достоверной информации о процессах и режимах в ЭЭС. Неточность и неполнота данной информации обусловлена имеющимися сложностями ее получения, а также случайным характером процессов и режи-

мов в ЭЭС, и характеризующих их электрических величин соответственно. Указанные условия функционирования РЗ недостаточно точно учитываются при определении их настроек, что приводит к неправильным действиям (ложным и излишним действиям, отказам в срабатывании).

Значительный вклад в решение вопросов разработки и совершенствования методов оценки надежности, эффективности функционирования и настройки РЗ, внесли следующие отечественные ученые: Беркович М.А., Фабрикант В.Л., Смирнов Э.П., Рипс Я.А., Барзам А.Б., Гук Ю.Б., Зейлидзон Е.Д., Манов Н.А., Федосеев А.М., Гельфанд Я.С., Манусов В.З., Каринский Ю.И., Якоб Д., Шалин А.И., Манов Н.А., Мёллер К.Ю., Коновалова Е.В., Нудельман Г.С., Гуревич В.И., Шнеерсон Э.М., Куликов А.Л. и др.

Проанализировав работы вышеуказанных авторов и предлагаемые ими методы, необходимо отметить, что большая часть работ направлена на оценку и повышение либо сугубо аппаратурной надежности, либо интегральной эффективности, учитывающей кроме вышеуказанных всякие другие причины потерь функционирования РЗ: аппаратурные отказы, ошибки эксплуатационного и монтажного персонала, влияние внешней среды, неблагоприятную электромагнитную обстановку, неправильную настройку и др. Однако только процессы и режимы, определяемые структурно-топологическими и коммутационными состояниями электрической сети, непосредственно функционально связаны с уставками. Все другие потери опосредовано влияют на уставки и не учитываются проектировщиками при выборе уставок и наладчиками при настройке, т.к. определяются факторами (аппаратурные отказы, ошибки обслуживающего персонала, стихийные явления) не связанными с атрибутами сети.

Ввиду случайного характера процессов в ЭЭС различными авторами (Шалин А.И., Якоб Д., Мёллер К.Ю., Каринский Ю.И.) были представлены вероятностно-статистические подходы для оценки эффективности настройки РЗА и оптимизации уставок. Однако они не получили широкого распространения из-за отмечаемых самими авторами сложности, высокой ресурсоемкости использования метода статистических испытаний при большом числе исходных данных, используемого для получения законов распределения вероятностей (ЗРВ) электрических величин, являющихся параметрами реагирования РЗ.

В соответствии с изложенным, работы по надежности и эффективности настройки, оценки качества настройки РЗ в настоящее время продолжают оставаться актуальными.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является обоснование и разработка критериев технического эффекта для выбора уставок (настройки) ступеней дистанционной защиты (ДЗ) высоковольтных линий и технической эффективности для оценки названной настройки, разработка вероятностно-статистических алгоритмов для расчета данных критериев, также применение данных критериев для структурно-функционального анализа для формирования вариантов построения эффективных ДЗ линий, удовлетворяющих требованиям к работе каналов ДЗ и наилучшей их настройке.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе решались следующие задачи:

- анализ условий формирования свойства селективности РЗ,
- изучение характеристик ступеней и особенностей измерительных органов дистанционных релейных защит,
- обзор существующих способов настройки и оценки качества функционирования релейной защиты,
- случайный характер процессов функционирования сети и аппаратуры РЗ, обоснование, выбор и определение параметров законов распределения вероятностей электрических величин (ЗРВ) в рабочих режимах и при КЗ с применением существующих и разработанных вероятностных методов, включая, вероятности редких событий потерь РЗ: отказов срабатывания, излишних и разных видов ложных действий,
- разработка алгоритмов для расчета составляющих технического эффекта и технической эффективности каналов ДЗ: вероятностей потенциального эффекта (КЗ на защищаемом объекте) и неправильных действий или потерь (отказы срабатывания, излишние и ложные действия) в условиях режимно-коммутационного функционирования сети и метрологических погрешностей аппаратуры,
- обобщенный режимно-коммутационный анализ сети, параметров реагирования и технической эффективности ступенчатых ДЗ линий,
- разработка и применение критериев и методик для расчетов и оптимизации настройки ступенчатых дистанционных РЗ и оценка их качества,

Методы исследования.

Для выполнения работы использованы методы электротехники, методы математического анализа, математической статистики, теории вероятностей. Для проведения экспериментально-расчетных исследований использовались промышленные программы (ТКЗ 3000, Дакар-99) математические пакеты (Mathcad, MATLAB) и офисный пакет приложений (Excel, Word, Visio).

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается строгостью теоретического обоснования, корректным использованием вероятностно-статистических методов, результатами теоретических и практических расчетов.

Новизна результатов

В работе содержатся следующие новые научные результаты:

1. Разработаны настроечные критерии в виде технического эффекта для первой ступени, минимума излишних действий для второй и третьей резервирующей ступеней ДЗ, также критерий технической эффективности для оценки качества настройки каждой из ступеней. На основе существующих вероятностно-статистических методов и разработанных алгоритмов сформировано математическое описание указанных критериев.

2. Обоснован равномерный закон распределения вероятностей замеряемого сопротивления от места установки ДЗ до места КЗ для однородных по сопротивлению участков силовых элементов сети.

3. Обнаружена независимость от режимно-коммутационных состояний сети зон захвата вторыми и третьими резервирующими ступенями защищаемого объекта пространств периферийных элементов, необходимых для вычисления вероятностей излишних действий.

4. Разработаны рекомендации и методика вероятностно-статистической настройки и определения технической эффективности каждой ступени ДЗ на основе режимно-коммутационного анализа зависимости технической эффективности от уставок по параметру реагирования (замеряемого сопротивления) и времени действия ступеней.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Получен инженерный аппарат в виде формул и алгоритмов, позволяющий просто определять наилучшие (оптимальные) уставки ДЗ путем задания их значений и определения критерия технического эффекта для первой ступени, минимального значения излишних действий для второй и третьей ступеней, а также вычислять техническую эффективность оптимального варианта как количественную оценку качества каждой ступени.

2. Благодаря объективной оценке качества каждой ступени получена практическая возможность отойти от жесткости требований руководящих указаний. Так, уставки вторых ступеней можно выбирать, исходя из чувствительности, проверяя наличие излишних действий, а по критерию технической эффективности наличие ухудшения качества.

3. Вследствие наличия обходных связей уставки по времени третьих резервирующих ступеней, приходится ограничивать волевым путем. Разработанный алгоритм вычисления вероятности излишних действий в таких случаях позволяет по минимуму этой вероятности выбирать оптимальный вариант, а по критерию технической эффективности оценивать качество этого оптимального варианта.

4. Благодаря разработанному алгоритму учета экономического соотношения удельных весов отказов срабатывания и излишних действий более точными и объективными становятся все предложенные критерии и алгоритмы.

5. Предложенные методика и алгоритмы могут быть использованы в соответствующих проектных и научно-исследовательских организациях, также в вузах электроэнергетического профиля.

6. Проведена проверка разработанного критериев технической эффективности, рекомендаций и методики для реального сетевого района Тюменской энергосистемы. Результаты работы использованы в учебном процессе Томского политехнического университета, на предприятии Филиала ОАО «СО ЕЭС» Томское РДУ (подтверждено актами об использовании результатов).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на: Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск 2010 г.); Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010-2012 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция «Научная инициатива иностранных студен-

тов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, 2011, 2012 гг.); Всероссийская научно-техническая конференция: Энергетика: экология, надежность, безопасность (г. Томск, 2010, 2011 гг.).

Публикации. По направлению диссертационной работы автором опубликовано 17 работ, в том числе: 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК; 13 статей в виде материалов докладов конференций; 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четыре глав, заключения, списка использованных источников из 63 наименований и приложения, содержит 18 рисунков, 6 таблиц. Общий объем диссертации – 194 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первой главе рассмотрена релейная защита, как метрическая система контроля и подавления (отключения) аварийного состояния защищаемого объекта. Показано, что основным построением существующей релейной защиты является метрологический принцип: релейный измерительный орган контролирует выбранную электрическую величину (параметр реагирования) и при превосходстве этой величиной заданного значения (уставки) на выходе появляется дискретный потенциальный сигнал, который напрямую или через схему логической обработки и управления действует на отключение выключателей компонента ЭЭС, на котором возникло изменение значения контролируемой электрической величины. Данная последовательность действий реализуется с помощью структуры в виде устройства, схемы или системы контроля параметра реагирования и системы управления. Последняя воспринимает потенциальный сигнал средства контроля, обрабатывает его и выдает сигнал на отключение выключателей защищаемого элемента. Таким образом, метрическая система релейной защиты включает в себя три составляющих: контроль параметра реагирования, управление средствами подавления аварийной ситуацией и непосредственно средства подавления – это выключатели.

Средства РЗ и электрические величины, используемые в качестве контролируемых сигналов или параметров реагирования в виде базовых электрических величин (ток и напряжение) и их производных или преобразованных из них мощности, сопротивления, симметричных составляющих и др. подразделены на потоковые (токи, симметричные составляющие, мощности и др.) и полевые (напряжение, частота) системы и сигналы. По своему проявлению дистанционные релейные защиты высоковольтных линий и их параметр реагирования, т.е. сопротивление следует рассматривать как потоковые системы и сигналы, что позволяет применить к оценке качества ДЗ критерии, алгоритмы и методики, разработанные для токовых РЗ.

Свойство селективности для потоковых систем РЗ подразделяется на два аспекта – первое и второе свойства селективности. Первое свойство селектив-

ности относится к способности устройств и систем контроля к отстройке от помех, а второе свойство является способностью выявления места повреждения (аварии) и его локализации. Первое свойство селективности присуще всем средствам контроля как потоковым, так и полевым, а второе только потоковым, взаимодействующими с потоковыми или проявляющимися как потоковые системы. Второе свойство селективности потоковых устройств и систем контроля реализуется в релейной защите с помощью внутренней схемно-конструкторской части РЗ (цепи циркуляции дифференциальных защит), внешних дополнительных блокирующих или разрешающих каналов (высокочастотные или оптоволоконные каналы обмена информацией о срабатывании комплектов РЗ на концах защищаемой линии), имитации действия этих каналов с помощью выдержек времени ступенчатых РЗ. Благодаря выделению второго свойства селективности у потоковых средств РЗ и способов ее достижения в секционированной электрической сети появляется теоретическое подтверждение известного факта, что РЗ с внутренними и внешними информационными каналами связи между датчиками или комплектами РЗ на выводах оборудования или концах линий имеют абсолютную селективность, а ступенчатые РЗ с выдержками времени при внешних КЗ могут излишне срабатывать. Это позволяет констатировать, что практический смысл изучать излишние действия имеет место только у ступенчатых (в том числе дистанционных) релейных защит.

Проведенный анализ потерь РЗ показал, что потери РЗ за счет аппаратурных отказов, ошибок обслуживающего персонала, стихийных явлений с точки зрения настройки РЗ рассматривать непродуктивно. Поэтому в структуре классификации потерь РЗ выделены функционально-метрологические потери (статистика показывает, что таких потерь может быть от 8 до 40 %). Данные потери целесообразно назвать функционально-метрологическими, т.к. они обусловлены регламентированными показателями функционирования сети и метрологическими погрешностями аппаратуры каналов (ступеней) РЗ. Они непосредственно связаны с уставками РЗ и структурно-режимными условиями функционирования электрической сети. Такие потери РЗ возникают в связи с проявлением неполноты свойств селективности и чувствительности, определяемых настройкой РЗ в существующем множестве режимно-коммутационных состояний сети. Как показывает опыт проектирования РЗ, обеспечить желаемую совместность с предельно возможным эффектом выполнения каждого свойства невозможно. Отсюда возникают соответствующие потери: при недостатке чувствительности – отказы срабатывания, при недостатке селективности – ложные и излишние действия. Эти конкурирующие противоречия основных свойств РЗ обуславливают экстремумы функционально-метрологических потерь и эффективности РЗ при варьировании уставок. В рамках этой работы рассматриваются такие потери и методы для минимизации этих потерь при варьировании уставок ДЗ.

Рассмотренные характеристики дистанционного принципа контроля КЗ как принципиально-особого способа РЗ показали, что:

1. Параметр реагирования сопротивление проявляется как конструкторская величина, выявляемая на каждом конце линии через параметры режима в общем случае в виде отношения напряжения к току, а при КЗ в виде отношения остаточного напряжения к току КЗ. Благодаря этому содержащиеся в первичном токе, а через него и в первичном остаточном напряжении погрешности и помехи существенно сокращаются. Погрешности и помехи сокращаются и во вторичных величинах, но менее радикально.

2. Анализ определения функциональных-метрологических потерь отказов срабатывания и излишних действий как вероятностей данных случайных событий при КЗ показал возможность использования на однородных участках линии весьма простого и удобного в вычислениях равномерного закона распределения вероятностей (ЗРВ) для измеряемых аппаратурой РЗ сопротивлений короткозамкнутых цепей от места установки аппаратуры РЗ на концах линии до места КЗ.

3. Динамический характер как быстро-изменяемых схемных параметров генераторно-двигательных цепей электроэнергетической системы при переходе от рабочего установившегося режима к режиму КЗ, так и более медленно-изменяемых активного тока и мощности доаварийного режима приводит к изменению измеряемого сопротивления по величине и углу. В связи с этим возникает необходимость модификации характеристики срабатывания реле сопротивления в комплексной области, в частности, мероприятий по ограничению и расширению характеристик срабатывания цифровых реле сопротивления дистанционных релейных защит.

4. Измерительный релейный орган производимых и применяемых ДЗ реле сопротивления, как правило, контролирует модуль вектора полного электрического сопротивления в комплексной плоскости, который характеризуется также и углом. Чтобы обеспечить сопоставимость замеров модулей сопротивления при отстройках, согласованиях и проверке чувствительности измеряемые сопротивления в электромеханических и микроэлектронных конструкциях релейных измерительных органов приводятся к углу максимальной чувствительности. Однако микропроцессорные реле такого параметра не имеют. Анализ показал, что замеры величин сопротивлений измерительными органами реле всех типов целесообразно рассматривать приведенными к углу линии.

Данные характеристики ДЗ используются в дальнейшем для постановки задач данной работы, позволяют составить критерии (функционалы) потерь, технического эффекта и технической эффективности ДЗ.

Оцениваются существующие российские и зарубежные методы оценки качества функционирования РЗ. Приведены недостатки существующих методов: 1) стремление сформировать глобальные критерии эффективности с учетом всех потерь, что приводит к большим объемам вычислений; 2) статистика потерь РЗ очень бедна и не представительна, что приводит к неправильному результату расчета. Анализ представленных существующих методов оценки качества функционирования РЗ позволил сформулировать и

обосновать место и значимость функционально-метрологических потерь РЗ в обобщенном критерии эффективности функционирования РЗ. Поскольку предлагаемые критерии технического эффекта и технической эффективности формируются из недетерминированных объектов (событий, процессов) целесообразно использовать вероятностный подход для задач настройки и оценки качества функционирования РЗ, который будет подробнее рассматриваться в следующих разделах данной работы.

Во второй главе вводятся основные положения по вероятностным мерам для количественного выражения потерь и технической эффективности ДЗ, сформулированы понятия критериев технического эффекта и технической эффективности при учете функционально-метрологических потерь ДЗ. Технический эффект E определяется как разность потенциально-возможного эффекта в виде вероятности $p(A)$ коротких замыканий A на защищаемом объекте, которые должна обнаружить ДЗ, и вероятности потерь $p(\Pi) = p(O) + p(I) + p(L)$ в виде суммы вероятностей отказов срабатывания $p(O)$, излишних $p(I)$ и ложных $p(L)$ действий, т.е.

$$E = p(A) - p(\Pi), \quad (1)$$

а техническая эффективность как отношение этой разности к потенциально-возможному эффекту

$$E_* = E / p(A). \quad (2)$$

Приводится феноменологический анализ предложенного критерия технической эффективности E_* при варьировании уставок ступеней ДЗ №1 вдоль пространств линий электрической сети, что позволило выявить потребительские качества в целом критерия и его составляющих с точки зрения поставленных практических задач настройки и оценки качества дистанционных релейных защит линий, сформировать укороченные выражения-критерии технического эффекта для настройки каждой из ступеней данной защиты. Наглядная иллюстрация данного анализа представлена на рис.1, на котором обозначено:

S – структура сети: 1) А, Б, В, Г – подстанции сети, 2) №, п, пп – защищаемая (№), предыдущая (п), предыдущая к предыдущей (пп) линии сети, 3) ОС1, ОС2, ОС3 – обходные связи, шунтирующие соответственно защищаемую (№), предыдущую (п) и предыдущие к предыдущим (пп) линии, 4) $e_1...e_7$ – ЭДС источников, 5) $z_1...z_4$ – сопротивления источников, 6) цифры 1, 2 в прямоугольниках – обозначение выключателей или комплектов защит на концах линий, 7) №1, п1, пп1 – номера защит линии в направления действия рассматриваемой защиты,

T – времена действия: измеряемые сопротивления защит №1, п1, пп1 при КЗ вдоль линий сети (ось абсцисс – сопротивление прямой последовательности z_1 , одинаковое обозначение с сопротивлением источника e_1) и временных характеристик (ось ординат t) ступеней защит вдоль тех же линий при обходных связях ОС1, ОС2. Обозначено на кривых и прямых: 1) буквой z_1 – уставки по

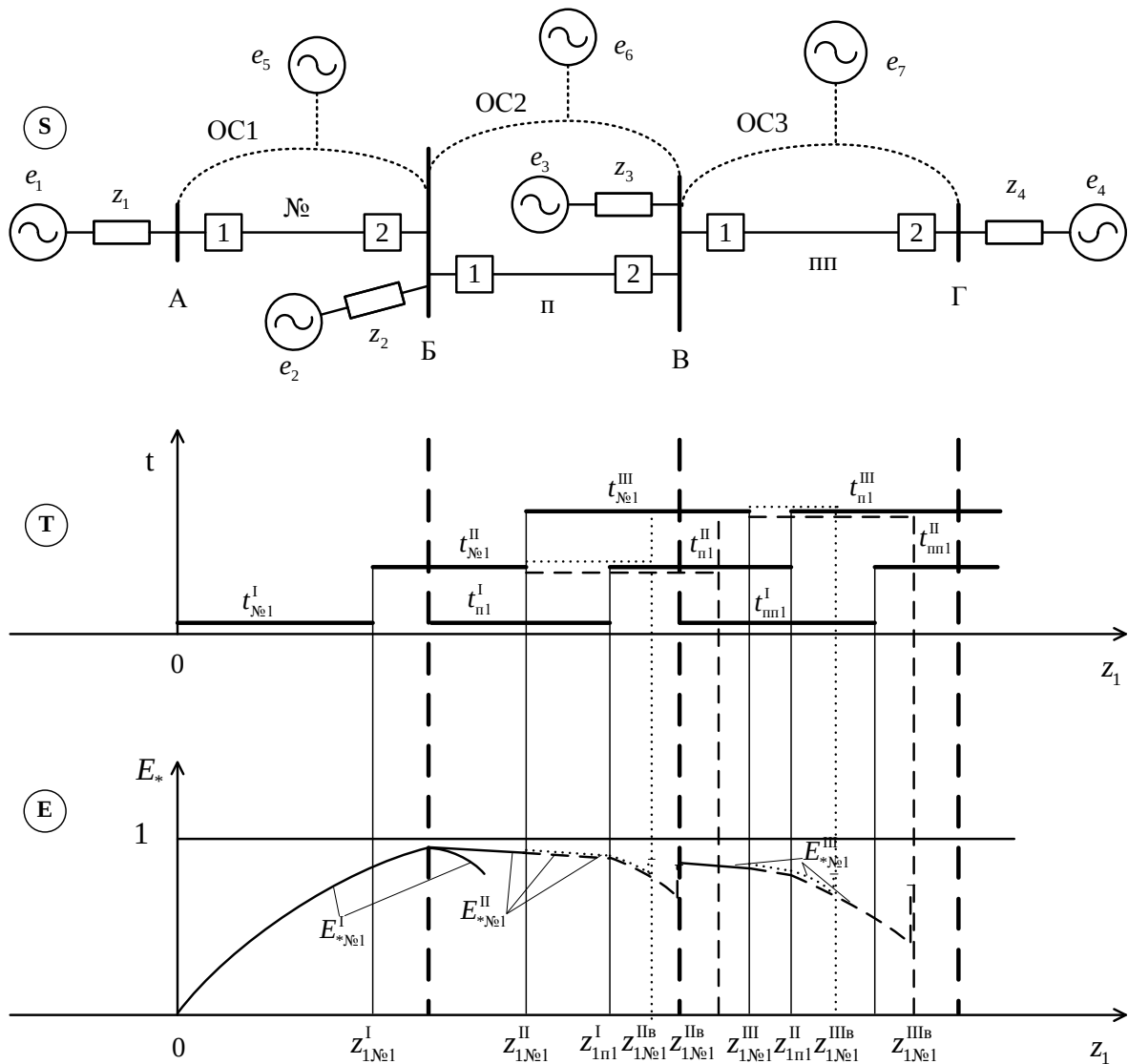


Рисунок 1 – Структура сети (S), времена действия (T), техническая эффективность (E) ступенной дистанционной защиты №1 линии №

сопротивлению с нижними индексами №1, п1, пп1 и верхними индексами: I, II, III соответствующих ступеней, включая букву «в» для вариаций уставок ($z_{№1}^I, z_{№1}^{II}, z_{№1}^{III}$ – принятые уставки I (первой), II (второй), III (третьей) ступеней защиты №1 по сопротивлению без вариаций, $z_{№1}^{IIв}$ – одна из вариаций второй ступени защиты №1), 2) буквой t – уставки по времени с такими же нижними индексами №1, п1, пп1 и верхними индексами: I, II, III ступеней ($t_{№1}^I, t_{№1}^{II}, t_{№1}^{III}$ – уставки I (первой), II (второй), III (третьей) ступеней защиты №1 по времени, аналогично обозначены уставки по времени других ступеней и защит, например $t_{п1}^{II}$),

E – возможные изменения технической эффективности дистанционной защиты E_* линии №1: I, II, III ступеней, отображенных в верхнем индексе.

На основе анализа получены выводы: 1) при настройке первых ступеней следует обязательно учитывать как отказы, так и излишние действия, имеющие место при КЗ, а ложные действия можно оценивать отдельно, т.к. они не зави-

сят от КЗ; 2) для второй ступени (настройка исходя из чувствительности) следует учитывать только излишние действия и оптимальным случаем настройки будет, когда они минимальны; 3) для третьей ступени как и второй с точки зрения ее настройки определяется только излишними действиями и оптимальным случаем настройки будет, когда излишние действия минимальны.

Анализ составляющих критерия технического эффекта возможен в двух вероятностных мерах: параметров потоков событий и вероятностей состояний после этих событий в течение интересующих средних продолжительностей (время обнаружения КЗ, фиксации КЗ и отключения поврежденного элемента, восстановления и т.д.). Вероятности состояний после событий или событий-состояний по сравнению с параметрами потоков событий являются более обобщенными, фундаментальными, информативными и диверсифицируемыми для задач в технических системах, т.к. отображают не только возникновение процесса, но также последующее его протекание в течение времени, предопределяемом характером рассматриваемой практической задачи и интересом исследователя. Поэтому в данной работе для математического отображения предложенных критериев, например технического эффекта

$$E = p(A) - p(O) - p(I) - p(L), \quad (3)$$

и их составляющих выбраны вероятности событий-состояний, в которых соединены оба главных компонента случайного процесса как возникновение событий, так и их интересующее последствие в желаемом временном диапазоне. Особенностью выражения (3) является приведение всех составляющих к одним и тем же условиям наблюдения, т.е. каждая из вероятностей выражения (3) является как бы безусловной вероятностью события-состояния, которая определяется как произведение всегда безусловного параметра потока возникновения события на среднюю продолжительность наблюдения интересующего последствия. Так, вероятность фиксации КЗ на защищаемом объекте $p(A)$ определяется по выражению:

$$p(A) = \omega_{\text{кз}} m(T_{\text{рз}}), \quad (4)$$

где $\omega_{\text{кз}}$ – параметр потока КЗ на защищаемом объекте, $m(T_{\text{рз}})$ – средняя продолжительность обнаружения и выработки сигнала на устранение КЗ релейной защитой (фактически ее уставка по времени).

Безусловные вероятности потерь $p(O)$, $p(I)$, $p(L)$ из-за редких и потому непредставительных статистик для определения параметров событий O , I , L не могут быть определены как $p(A)$. Для исключения статистической погрешности в искомых составляющих критериев с редкой статистикой рекомендовано воспользоваться достаточно представительной статистикой других событий, совместно с которыми редкие события могут произойти, вычислять их по правилу умножения вероятностей как произведение условной вероятности интересующего редкостного события и безусловной вероятности статистически представительного другого события-состояния, на поле которого возникает редкостное событие (рис. 2). Например, безусловная вероятность отказов срабатывания $p(O) = p(O/A)p(A)$, где $p(O/A)$ – условная вероятность отказов

срабатывания при КЗ на защищаемом объекте, а $p(A)$ – безусловная вероятность короткозамкнутого состояния. Аналогично безусловная вероятность излишних действий $p(I)=p(I/BK)p(BK)$, где $p(I/BK)$ – условная вероятность излишних действий при внешнем коротком замыкании (BK), а $p(BK)$ – вероятность состояния внешнего КЗ на внешних элементах; безусловная вероятность ложных действий $p(L^{нам})=p(L^{нам}/НАМ)p(НАМ)$ при бросках тока намагничивания через защищаемый объект, где $p(L^{нам}/НАМ)$ – условная вероятность ложных действий при названных бросках, а $p(НАМ)$ – безусловная вероятность процесса броска тока намагничивания; безусловная вероятность ложных действий в рабочих эксплуатационных режимах $p(L^э)=p(L^э/Э)p(Э)$, где $p(L^э/Э)$ – условная вероятность ложных действий в рабочих режимах, а $p(Э)$ – вероятность рабочего эксплуатационного состояния. Безусловные вероятности состояний определяются по выражениям: вероятность внешних КЗ $p(BK)=\omega_{BK}m(T_{рз})$, где ω_{BK} – параметр потока внешних КЗ, $m(T_{рз})$ – средняя продолжительность внешнего КЗ с точки зрения фиксации ВК рассматриваемой защитой; вероятность бросков тока намагничивания $p(НАМ)=\omega_{нам}m(T_{нам})$, где $p(НАМ)$ – вероятность, $\omega_{нам}$ – параметр потока броска тока намагничивания; вероятность рабочих или эксплуатационных режимов как вероятность противоположного события-состояния относительно нерабочих событий-состояний. $p(Э)=1-p(A)-p(BK)-p(НАМ)$. (5).

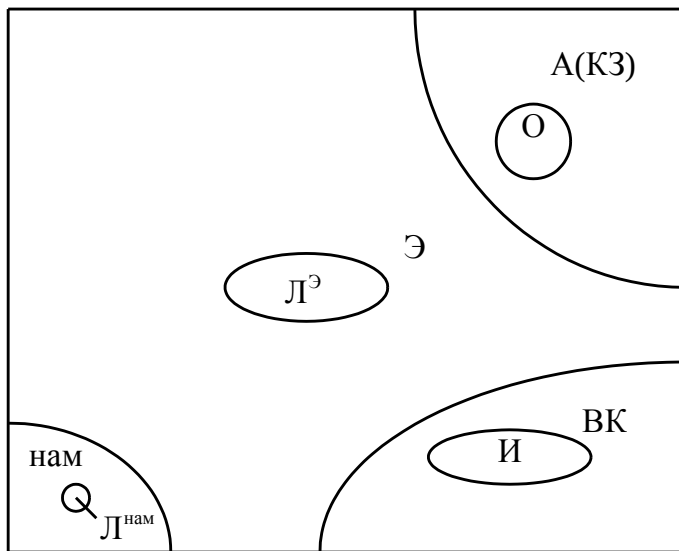


Рисунок 2 – Диаграмма Венна событий-состояний на поле всеобъемлющих условий защищаемого объекта дистанционной защитой

Условная вероятность каждого редкого события находится по условному закону распределения вероятностей (ЗРВ) параметра реагирования (сопротивления замера) как вероятность попадания в интересующий интервал данного параметра. Условные ЗРВ формируются по разработанному в Томском политехническом университете методу селекции границ исходных и выходных данных (СГИД), позволяющего по ЗРВ аргументов (исходных данных) функциональной зависимости (ФЗ), например сопротивления замера,

сформировать ЗРВ указанной ФЗ. Зависимость может быть любой размерности. В случае метрической явной или неявной, детерминированной или случайной зависимости, например электрических величин (включая сопротивления замера) в рабочих режимах и при КЗ метод СГИД реализуется в последовательности: задается вариант квантилей одного порядка всех исход-

ных данных электрической сети (активной и реактивной загрузки узлов сети, напряжения) или аргументов ФЗ и находится ее значение (путем применения промышленных программ Дакар для установившихся режимов, ТКЗ3000 или АРМ СРЗА для измеряемого сопротивления). Это значение есть квантиль порядка исходных данных при нарастающей ФЗ или разности единицы и порядка квантиля исходных данных при убывающей ФЗ. По порядкам и самим значениям квантилей ФЗ при разных вариантах исходных данных как квантилей разных порядков выполняется построение ЗРВ в виде функции распределения вероятностей (ФРВ). Нарастание или убывание ФЗ при этом определяется по разностям ее квантилей и порядков квантилей соседних вариантов исходных данных. При известном виде ЗРВ ФЗ число вариантов квантилей исходных данных и ФЗ требуется по числу параметров ФРВ ФЗ. В случае электрических величин в рабочих режимах и при КЗ – это нормальный ЗРВ с двумя параметрами. Поэтому требуется два варианта квантилей исходных данных и ФЗ, по которым определяются параметры ФРВ. В случае ФЗ в виде сопротивления замера при КЗ метод СГИД реализуется с помощью следующей последовательности логических обоснований: в рабочих режимах напряжение на пространстве линий электрических сетей стремятся поддерживать близкими по величине, поэтому КЗ в каждой точке линии можно считать равновероятным. Следовательно, равновероятными будут и замеры сопротивлений от места размещения ДЗ на концах линии до места КЗ, а значит замеры сопротивлений будут иметь равномерный ЗРВ на однородной линии с условной плотностью распределения вероятностей (ПРВ), обратно пропорциональной сопротивлению линии.

Полученные результаты позволили разработать простые выражения критериев технического эффекта для настройки ступеней ДЗ линий, осуществить предметный анализ составляющих технического эффекта этих ступеней и предложить построение упрощенных практических вариантов ступеней ДЗ.

В третьей главе обсуждаются выражения критериев технического эффекта и его составляющих, используемых для выбора и оптимизации уставок по параметру реагирования (сопротивлению замера) ступеней ДЗ, приводятся также полные выражения технической эффективности, используемые для оценки качества принятых уставок ступеней. Выражения технической эффективности приводятся для первой (6), второй (7) и третьей (8) ступеней ДЗ линии с применением обозначений на упрощенной сети рис. 1, а для резервирующей третьей ступени (9) также с применением обозначений на полной имитирующей реальную схему рис. 3, т.е.:

$$\text{— для первой ступени } E_{N_{\text{д}1}}^I = p(A_{N_{\text{д}}}^I) - p(O_{N_{\text{д}1}}^I) - \sum_{n=1}^{n_n} p(I_{N_{\text{д}1-n}}^I) - p(L_{N_{\text{д}1}}^{\text{Iнам}}) - p(L_{N_{\text{д}1}}^{\text{Iэ}}), \quad (6)$$

$$\text{— для второй ступени } E_{N_{\text{д}1}}^{\text{II}} = p(A_{N_{\text{д}}}^{\text{II}}) - p(O_{N_{\text{д}1}}^{\text{II}}) - \sum_{n=1}^{n_n} p(I_{N_{\text{д}1-n}}^{\text{II}}) - p(L_{N_{\text{д}1}}^{\text{IIэ}}), \quad (7)$$

— для третьей ступени (выражение по рисунку 1)

$$E_{\text{№1}}^{\text{III}} = p(A_{\text{№}}) + \sum_{\text{п}=1}^{n_{\text{п}}} p(A_{\text{п}}) - p(O_{\text{№1}}^{\text{III}}) - \sum_{\text{п}=1}^{n_{\text{п}}} p(O_{\text{п}}^{\text{III}}) - \sum_{\text{п}=1}^{n_{\text{п}}} \sum_{\text{пп}=1}^{n_{\text{пп}}} p(I_{\text{№1 п-пп}}^{\text{III}}) - p(L_{\text{№1}}^{\text{III}}), \quad (8)$$

– для третьей ступени (выражение по рисунку 3)

$$E_{\text{№1}}^{\text{III}} = p(A_{\text{№}}^{\text{III}}) + \sum_{1\text{пi}=1}^{n_{1\text{пi}}} p(A_{1\text{пk}}^{\text{III}}) - p(O_{\text{№1}}^{\text{III}}) - \sum_{1\text{пk}=1}^{n_{1\text{пk}}} p(O_{1\text{пk}}^{\text{III}}) - \sum_{j\text{п}=1}^{n_{j\text{п}}} \sum_{j\text{пi}=1}^{n_{j\text{пi}}} \sum_{j\text{пik}=1}^{n_{j\text{пik}}} p(I_{\text{№1-jпik1}}^{\text{III}}) - p(L_{\text{№1}}^{\text{III}}) \quad (9)$$

где нижние индексы: №, п, 1п, пп, jпi, 1пk – это обозначения защищаемой линии, предыдущих элементов (линий и трансформаторных компонентов), элементов первой периферии, предыдущих к предыдущим элементам или элементов второй периферии одной из групп, i-й группы jп-й периферии, №1 – защита линии № на конце 1; №1-п, п-пп – обозначения линий первой, второй периферии по рисунку 1; №1-jпik1 – обозначения взаимодействующих защит №1 и jпik1 (jп-й периферии, i-й группы, k-го элемента на конце 1) в направлении действия защиты №1 по рисунку 3, $n_{\text{п}}$, $n_{1\text{п}}$ – число предыдущих линий или элементов первой периферии, $n_{\text{пп}}$ – число линий или элементов второй периферии, $n_{j\text{пik}}$ – число защит периферийных элементов (линий и трансформаторных элементов) i-й группы jп-й периферии, взаимодействующих с защитой №1, $n_{j\text{пi}}$ – число групп элементов jп-й периферии $n_{j\text{п}}$ – число периферий до jпik-го элемента.

Вероятности КЗ: для первой ступени $p(A_{\text{№}}^{\text{I}}) = \omega_{\text{№}} m(T_{\text{№}}^{\text{I}})$; второй ступени $p(A_{\text{№}}^{\text{II}}) = \omega_{\text{№}} m(T_{\text{№}}^{\text{II}})$, где $\omega_{\text{№}}$ – параметр потока интересующих видов КЗ на защищаемой линии, $m(T_{\text{№}}^{\text{I}})$ и $m(T_{\text{№}}^{\text{II}})$ – средние продолжительности обнаружения (фиксации) КЗ каналами соответственно первой и второй ступеней, практически уставки по времени первой и второй ступеней; для третьей ступени $p(A_{\text{№}}^{\text{III}}) + \sum_{1\text{пi}=1}^{n_{1\text{п}}} p(A_{1\text{пk}}^{\text{III}}) = \omega_{\text{№}} m(T_{\text{№}}^{\text{III}}) + \sum_{1\text{пi}=1}^{n_{1\text{п}}} \omega_{1\text{пk}} m(T_{1\text{пk}}^{\text{III}})$, где $\omega_{1\text{пk}}$ – параметр потока интересующих видов КЗ на k-й линии первой периферии 1п, $m(T_{\text{№}}^{\text{III}})$ – средняя продолжительность обнаружения (фиксации) КЗ каналом третьей ступени (временной уставки третьей ступени).

Излишние действия у первой ступени имеют место при КЗ на внешних 1) как одновременные совместные действия с быстродействующими защитами (первыми ступенями, защитами на дифференциальном принципе) при КЗ на предыдущих элементах в зонах захвата их пространства первой ступенью защищаемой линии, определяемой минимальной границей как этой ступени, так и быстродействующей защитой каждого предыдущего элемента, 2) как отказы срабатывания первых ступеней предыдущих линий в зонах захвата их пространства первой ступенью защищаемой линии, когда граница последней превышает границу первой ступени предыдущей линии. Исходя из сказанного, в вероятность излишних действий первой ступени защищаемой линии должны быть включены половина вероятности совместных действий быстродействующих защит предыдущих линий с первой ступенью защищаемой линии и в пол-

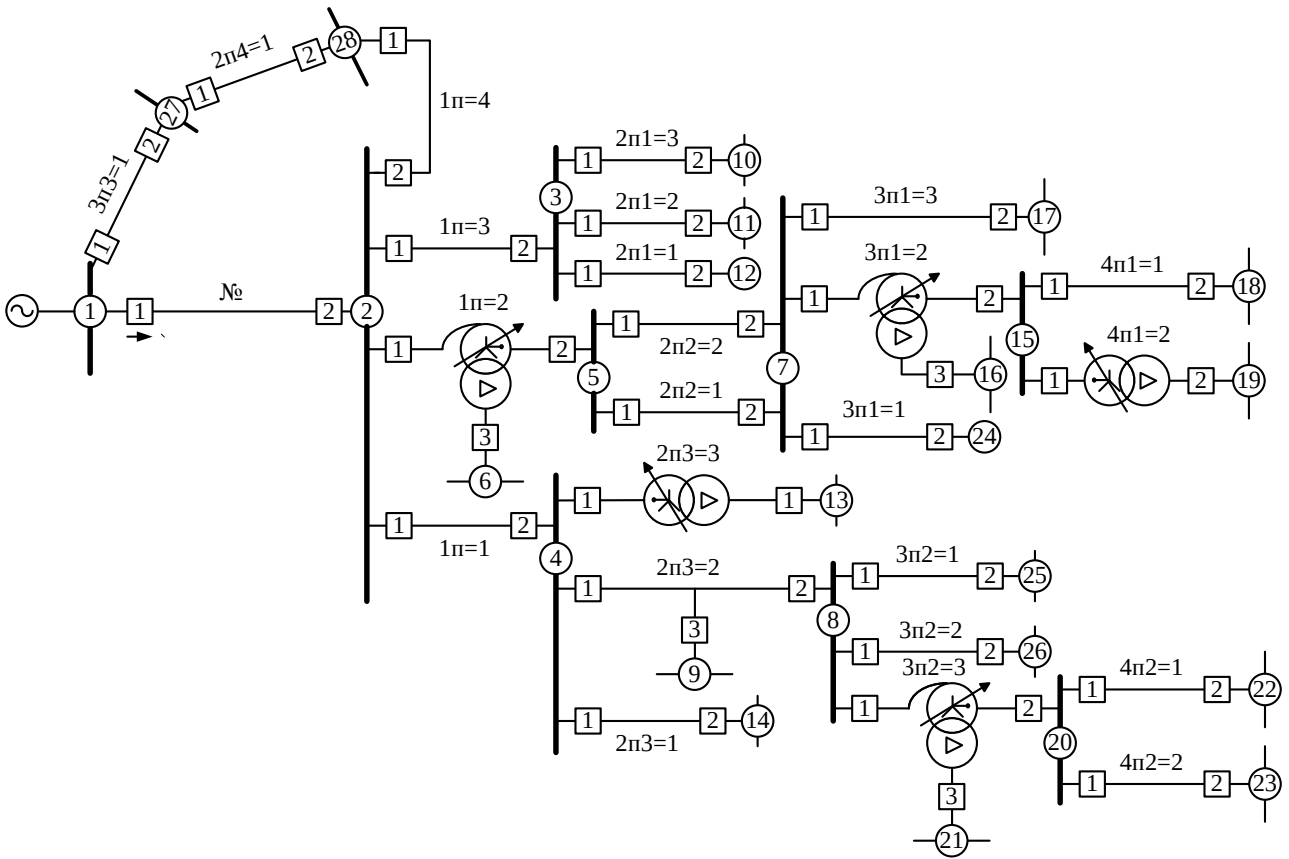


Рисунок 3 –Схема заданной сети

ном объеме вероятность отказов срабатывания первых ступеней предыдущих линий. т.е.

$$\sum_{n=1}^{n_n} p(I_{N_{\text{эл}n-1}}^I) = \sum_{n=1}^{n_n} \left[\frac{1}{2} p(D_{N_{\text{эл}n}} / BK_n) p(BK_n) + p(O_{N_{\text{эл}n}} / BK_n) p(BK_n) \right], \quad (10)$$

где Д, О, ВК – события действия, отказа срабатывания защит на п-х элементах при коротком замыкании ВК_п на этих элементах. Определение условных вероятностей действия и отказов срабатывания быстродействующей защиты каждого предыдущего элемента: первой ступени предыдущей линии $p(D_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n)$ и $p(O_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n)$, дифференциальной защиты предыдущего трансформаторного элемента $p(D_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n)$ и $p(O_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n)$ осуществляется как средние значения (полусуммы) данных вероятностей при максимальных (индекс а) и минимальных (индекс и) в обозначениях условных вероятностей для границ первой ступени защищаемой линии на пространстве каждого предыдущего элемента, т.е.:

$$\begin{aligned} p(D_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n) &= [p_a(D_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n) + p_i(D_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n)] / 2, \\ p(O_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n) &= [p_a(O_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n) + p_i(O_{N_{\text{эл}n1}}^I / BK_n)] / 2, \\ p(D_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n) &= [p_a(D_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n) + p_i(D_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n)] / 2, \\ p(O_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n) &= [p_a(O_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n) + p_i(O_{N_{\text{эл}n}}^{\text{сд}} / BK_n)] / 2, \end{aligned} \quad (11)$$

Условные вероятности находятся по формулам, исходя из равномерного ЗРВ сопротивления от начала предыдущего элемента до места КЗ, например, для

предыдущей линии при максимальном коэффициенте токораспределения:

$$p_a(D_{N_{\text{лп1}}}^I / BK_n) = \min[(z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1па}}}^I), z_{\text{п1}}^I] / z_{\text{п1}}; \quad (12)$$

при минимальном коэффициенте токораспределения и при $[(z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1пп}}}^I) - z_{\text{п1}}^I] > 0$,

$$p_n(O_{N_{\text{лп1}}}^I / BK_n) = [(z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1пп}}}^I) - z_{\text{п1}}^I] / z_{\text{п1}}; \quad (13)$$

а при $[(z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1пп}}}^I) - z_{\text{п1}}^I] \leq 0$ $p_n(O_{N_{\text{лп1}}}^I / BK_n) = 0$;

для предыдущего трансформаторного элемента при максимальном коэффициенте токораспределения,

$$p_a(D_{N_{\text{лп1}}}^{\text{сд}} / BK_n) = \min[(z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1па}}}^I), z_{\text{п1}}^{\text{сд}}] / z_{\text{пт}} = (z_{N_{\text{л1}}}^I - z_{N_{\text{л1па}}}^I) / z_{\text{пт}}. \quad (14)$$

Последнее равенство, как правило, имеет место всегда, безразлично для какого коэффициента токораспределения делается вычисление условной вероятности, потому что уставка чувствительного канала современной дифференциальной защиты трансформаторных элементов в виде сопротивления в координатах сквозных токов: $z_{\text{п}}^{\text{сд}} = k_{\text{чип}} z_{\text{п1-п2}}$ для двухобмоточного трансформатора, $z_{\text{п}}^{\text{сд}} = k_{\text{чип}} \min(z_{\text{п1-п2}}, z_{\text{п1-п3}})$ для трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора всегда очень большая вследствие большого минимального коэффициента чувствительности $k_{\text{чип}}$ чувствительного канала дифференциальной защиты и существенно превышает межобмоточное сопротивление $z_{\text{п1-п2}}$ двухобмоточного трансформатора, межобмоточные сопротивления $z_{\text{п1-п2}}$ и $z_{\text{п1-п3}}$ трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора (обозначения указанных межобмоточных сопротивлений следует усматривать из рис. 3 в соответствии с выводами обмоток 1, 2, 3 названных трансформаторных элементов).

Безусловные вероятности состояния внешнего КЗ на n -м предыдущем элементе, линии и трансформаторном элементе

$$p(BK_n) = p(BK_{\text{лп}}) = \omega_{\text{лп}} m(T_{\text{лп}}^I) \text{ и } p(BK_n) = p(BK_{\text{пт}}) = \omega_{\text{пт}} m(T_{\text{пт}}^{\text{д}}), \quad (15)$$

определяются произведением параметра потока КЗ на предыдущей линии $\omega_{\text{лп}}$, предыдущем трансформаторном элементе $\omega_{\text{пт}}$ и средней продолжительности фиксации КЗ быстродействующей защитой: первой ступенью предыдущей линии $m(T_{\text{лп}}^I)$, дифференциальной защитой предыдущего трансформаторного элемента $m(T_{\text{пт}}^{\text{д}})$.

Излишние действия у второй ступени имеют место, если уставка выбрана, исходя из чувствительности. Данные потери возникают вследствие одновременности действия вторых ступеней защищаемой и предыдущих линий и появления зон действия второй ступени защищаемой линии при КЗ на пространстве коротких предыдущих линий, превышающих по параметру реагирования (замеряемому сопротивлению) зоны действия первых ступеней этих линий и в пределах их пространства (действие вторых ступеней предыдущих линий), а также, если зоны действия второй ступени защищаемой линии при КЗ на пространстве коротких предыдущих линий окажутся больше зоны действия второй ступени этих линий в пределах их пространства (отказы вто-

рых ступеней предыдущих линий). Расчеты выполняются аналогично расчетам для первой ступени, но выражение (10) переписывается для второй ступени, в выражении (11) исключаются составляющие с трансформаторными элементами, а выражения (12), (13) и (15) модифицируются соответственно в виде $p_a(D_{\text{№1п1}}^{\text{II}} / \text{ВК}_{\text{п}}) = \min[(z_{\text{№1}}^{\text{II}} - z_{\text{№1па}} - z_{\text{п1}}^{\text{I}}), (z_{\text{п1}}^{\text{II}} - z_{\text{п1}}^{\text{I}})] / z_{\text{п1}}$,

$$p_a(O_{\text{№1п1}}^{\text{II}} / \text{ВК}_{\text{п}}) = [(z_{\text{№1}}^{\text{II}} - z_{\text{№1па}}) - z_{\text{п1}}^{\text{II}}] / z_{\text{п1}} \text{ и } p(\text{ВК}_{\text{п}}) = p(\text{ВК}_{\text{п1}}) = \omega_{\text{п1}} m(T_{\text{п1}}^{\text{II}}).$$

Вследствие независимого выбора уставок по сопротивлению у резервирующих ступеней селективность последних обеспечивается за счет согласования их выдержек времени, что удастся выполнить однозначно только в радиальных сетях, а при наличии обходных связей (рис.3) система выдержек времени является вынужденной и принципиально не может обеспечить однозначную селективность резервирующих ступеней защиты сети, что приводит к излишним действиям рассматриваемой резервирующей ступени. В отличие от формирования излишних действий основной второй ступени ДЗ, предназначенной для защиты в целом линии в требуемом качестве во взаимодействии с первой ступенью по параметру реагирования и времени и поэтому учитываемым по действию и отказу срабатывания первых ступеней и быстродействующих защит предыдущих элементов, при формировании излишних действий резервирующих ступеней учет работы основных ступеней периферийных элементов сети нецелесообразен и неправомерен, т.к. это приведет к завышенной оценке качества функционирования ее.

Механизм формирования вероятностей излишних действий резервирующих ступеней аналогичен формированию излишних действий второй ступени. Однако в отличие от основных ступеней, у которых выдержки времени одноименных ступеней практически одинаковые, у резервирующих ступеней сложнозамкнутых сетей времена действия могут быть разными: у рассматриваемой резервирующей ступени защищаемой линии и у резервирующей ступени периферийного элемента времена действия могут быть одинаковые, больше, чем у рассматриваемой резервирующей ступени защищаемой линии и больше у резервирующей ступени периферийного элемента. Поэтому следует рассматривать отдельно три названных случая по времени при взаимодействии со всеми элементами сети, на пространство которых распространяется резервирующая ступень

$$\sum_{jn=1}^{n_{jn}} \sum_{jni=1}^{n_{jni}} \sum_{jnik=1}^{n_{jnik}} p(I_{\text{№1-jnik1}}^{\text{III}}) = \sum_{jn=1}^{n_{jn}} \sum_{jni=1}^{n_{jni}} \sum_{jnik=1}^{n_{jnik}} \left[\frac{1}{2} p(D_{\text{№1jnik1}}^{\text{III}} / \text{ВК}_{\text{jnik}}) p(\text{ВК}_{\text{jnik}}) + p(O_{\text{№1jnik1}}^{\text{III}} / \text{ВК}_{\text{jnik}}) p(\text{ВК}_{\text{jnik}}) \right] \quad (16),$$

где в соответствии с рис. 3 просуммированы вероятности возможных излишних действий резервирующей третьей ступени (III) защиты №1 при КЗ на каждом $k=m$ элементе i -й сборки j -й периферии сети, на который распространяется зона взаимодействия третьей ступени защиты №1, с действиями $D_{\text{№1jnik1}}^{\text{III}}$ и отказами срабатывания $O_{\text{№1jnik1}}^{\text{III}}$ резервирующей ступен защиты $jnik1$ которого

она взаимодействует. Условные вероятности действий $p(D_{\text{№1}j\text{nik}1}^{\text{III}} / BK_{j\text{nik}})$ и отказов срабатывания $p(O_{\text{№1}j\text{nik}1}^{\text{III}} / BK_{j\text{nik}})$, также вероятности состояний внешних КЗ находятся аналогично по выражениям (11) – (15).

Полученные результаты разработки алгоритмов и методик расчета технического эффекта настройки и технической эффективности для оценки качества ступеней ДЗ позволили рекомендовать построение вариантов ДЗ с уставкой второй ступени, исходя из чувствительности, а также с уставкой первой ступени с расширенной областью быстродействующего срабатывания. Это снижает трудоемкость выбора уставок, а инструмент технической эффективности позволяет подобрать требуемое качество функционирования ДЗ. Разработан практический критерий экономической оценки удельных весов отказов срабатывания и излишних действий.

В четвертой главе приведена численная реализация пользования аппаратом разработанных алгоритмов и методик исследований на примере расчета и анализа ДЗ линии 220 кВ ПС Сургутская – ПС Контур (РЗ со стороны ПС Сургутская) одной из российских энергосистем. Топология анализируемого района приведена на рисунке 4. Линии п1, п2 и п3 являются предыдущими линиями (первой периферии), линии пп1 и пп2 являются линиями второй периферии, автотрансформаторы на подстанциях исключены.

Уставки первой и второй ступеней ДЗ на линиях п1, п2, п3 выбраны по руководящим указаниям. Для рассматриваемой ДЗ №1 уставки первой и второй ступеней варьируются в районе максимума технической эффективности на противоположном конце линии №. Результаты расчета технической эффективности при варьировании уставок представляются ниже в таблицах.

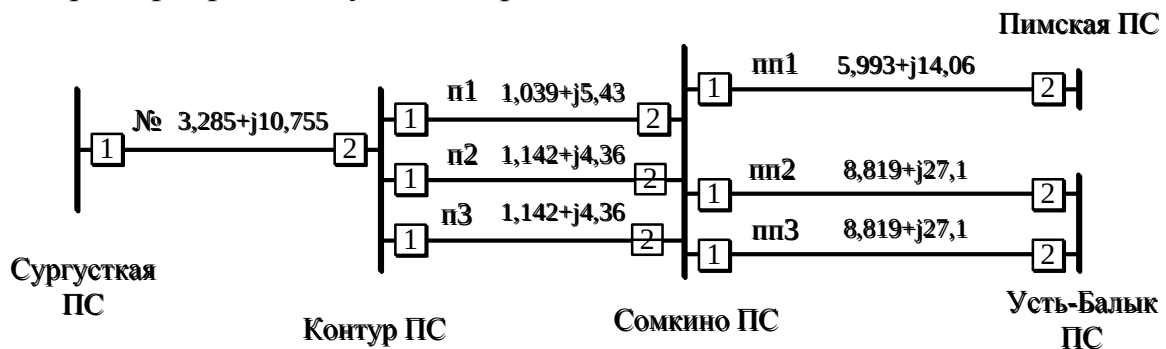


Рисунок 4 – Топология анализируемого района

Таблица 1. Результаты расчета технической эффективности при варьировании уставок первой ступеней ДЗ №,1

Уставка первой ступени (Ом)	Вероятность отказов срабатывания	Вероятность излишних действий	Технический эффект	Техническая эффективность (%)
9,5	$0,932 \cdot 10^{-11}$	0	$5,093 \cdot 10^{-11}$	84,53
10	$0,664 \cdot 10^{-11}$	0	$5,361 \cdot 10^{-11}$	88,98
10,5	$0,396 \cdot 10^{-11}$	0	$5,629 \cdot 10^{-11}$	93,43
11	$0,128 \cdot 10^{-11}$	0	$5,897 \cdot 10^{-11}$	97,88

11,238	0	0	$6,025 \cdot 10^{-11}$	99,5
11,5	0	$0,217 \cdot 10^{-11}$	$5,808 \cdot 10^{-11}$	96,39
12	0	$0,632 \cdot 10^{-11}$	$5,393 \cdot 10^{-11}$	89,5
12,5	0	$1,047 \cdot 10^{-11}$	$4,978 \cdot 10^{-11}$	82,62
13	0	$1,462 \cdot 10^{-11}$	$4,563 \cdot 10^{-11}$	75,74

Таблица 2. Результаты расчета технической эффективности при варьировании уставок второй ступеней ДЗ №,1

Уставка первой ступени (Ом)	Вероятность отказов срабатывания	Вероятность излишних действий	Техническая эффективность (%)
14,048	0	0	99,6
14,5	0	0	99,44
15	0	0	99,16
15,5	0	$0,25 \cdot 10^{-10}$	96,22
16	0	$0,559 \cdot 10^{-10}$	91,55
16,5	0	$1 \cdot 10^{-10}$	84,9
17	0	$1,44 \cdot 10^{-10}$	78,26

Результаты таблиц при оговоренных ограничениях подтверждают полученные из феноменологического анализа выводы о максимуме технической эффективности и ее изменениях. Видно, что излишние действия у второй ступени отсутствуют пока ее уставка не достигнет концов первых ступеней предыдущих линий и не начнутся одновременные действия второй ступени защиты №1 защищаемой линии со вторыми ступенями защит п11, п21, п31 предыдущих линий п1, п2 и п3.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных исследований и разработок, позволившие достичь поставленную в диссертации цель:

1.Выделена из общих условий работы релейной защиты (РЗ), функционально-метрологическая составляющая, определяемая режимно-коммутационными действиями, состояниями в сети и метрологическими возможностями аппаратуры, и которая непосредственно связана с уставками.

2.Сформированы для ступеней дистанционной защиты (ДЗ) линий критерии технического эффекта как разность потенциально-возможного эффекта или коротких замыканий (КЗ) на защищаемой линии и потерь (отказов срабатывания, излишних и ложных действий) и технической эффективности как отношение технического эффекта к потенциально-возможному эффекту.

3.Анализ зависимости технической эффективности (в условиях равнозначности отказов срабатывания и излишних действий, без учета ложных действий и погрешности аппаратуры) от сопротивления уставок ступеней ДЗ выявил максимум критерия для первой и второй ступеней при уставках, равных сопротивлению защищаемой линии, а для третьей резервирующей ступени – при сопротивлениях уставок до удаленных концов предыдущих линий. Также при этом выявлены критерии для настройки: первых ступеней по максимуму

технического эффекта, а вторых и третьих ступеней по минимуму излишних действий.

4. Предложен подход совмещения редкого события с достаточно статистически представительным событием-состоянием для расчетов вероятностей потерь ДЗ. Условные вероятности совмещения редкостного события определяются как вероятности принятия параметром реагирования (замеряемого сопротивления) из логически предопределенных задач интервалов по условному закону распределения вероятностей (ЗРВ) параметра реагирования, реализуемого с помощью примененного метода селекции границ интервалов исходных и выходных данных (СГИД), который по ЗРВ исходных данных (активных и реактивных мощностей узлов сети), позволяет определить ЗРВ функциональных зависимостей (ФЗ) в виде замеров сопротивлений ДЗ. Показано, что замеряемое сопротивление в рабочих режимах распределено по нормальному, а при КЗ по равномерному ЗРВ. Реализация ФЗ замеряемого сопротивления в рабочих режимах обеспечивается с помощью любого вычислительного расчетного комплекса (ВРК), а при КЗ – с помощью ВРК ТКЗ-3000 или АРМ СРЗА, исходные данные при этом должны быть представлены в виде квантилей заданных порядков.

5. Разработанные критерии настройки первой, второй ступеней, а также третьей резервирующей ступеней ДЗ на базе технического эффекта и относительной оценки качества данной настройки в виде технической эффективности вполне практически приемлемы и целесообразны для внедрения при проектировании и наладке ДЗ любых сетей. По результатам применения названных критериев разработаны упрощенные варианты построения ступенчатых ДЗ.

6. Значения положительной технической эффективности лежат в пределах единицы и близость их к единице является показателем высшего технического качества РЗ.

В приложениях представлено 2 акта использования результатов диссертационной работы.

Основные публикации по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Прутик А.Ф., Чан Минь, Шмойлов А.В. Селективность и техническая эффективность релейной защиты и автоматики // Журнал Известия ВУЗов «Проблемы энергетики» – 2010. – № 3–4/1. – С.154–163.

2. Ле Тхи Хоа, Чан Хоанг Куанг Минь, Шмойлов А.В. Анализ дистанционных защит линий и разработка рекомендаций для них настройки // Журнал Известия ВУЗов «Электромеханика» 2011. – № 6. – С.92–97.

3. Чан Хоанг Куанг Минь, Шмойлов А.В. Техническая эффективность дистанционных релейных защит высоковольтных линий // Журнал Известия ТПУ 2012. – № 4. – С.72-78.

Патент РФ на изобретение:

1. Пат. № 2457593 РФ, МПК H02H 3/08. Способ построения дистанционной защиты двухконцевой линии и обнаружения места короткого замыкания на

ней // А.В. Шмойлов, Чан Хоанг Куанг Минь, А.Ф. Прутик; заявитель и патентообладатель «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; – № 2011121633/07; заявл. 27.05.2011; опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21. – 15 с.

Научные работы, опубликованные в сборниках трудов международных и российских конференций:

1. Tran Hoang Quang Minh, Shmoilov A.V. Technical efficiency of line distance protection // Proceedings of The 5th International Forum On Strategic Technology (IFOST 2010). – Ulsan, Korea, 2010. – ISBN: 978-1-4244-9038-7– P. 335–340.

2. Tran Hoang Quang Minh, Shmoilov A.V. Using the criterion of technical efficiency for set-up of line distance relay protection // Proceedings of The 6th International Forum On Strategic Technology (IFOST 2011). – Harbin, Heilongjiang, China, 2011. – ISBN: 978-1-4577-0398-0 – P. 512–516.

3. М.Чан, Шмойлов А.В. Особенности дистанционной защиты линии для изучения технической эффективности // Современные техника и технологии: XVI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. – Томск: Издательство ТПУ, 2010. – Т.1. – С.140–141.

4. Чан Хоанг Куанг Минь. Алгоритмы для определения технической эффективности основных ступеней дистанционной релейной защиты высоковольтных линий // Современные техника и технологии: XVII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. – Томск: Издательство ТПУ, 2011. – Т.1. – С.126–127.

5. Чан Хоанг Куанг Минь. Техническая эффективность и рекомендации для настройки основных ступеней дистанционной релейной защиты высоковольтных линий // Современные техника и технологии: XVIII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. – Томск: Издательство ТПУ, 2012. – Т.1. – С.131–132.

6. Чан Хоанг Куанг Минь. Техническая эффективность основных ступеней дистанционных релейных защит высоковольтных линий от однофазных коротких замыканий на землю // Наука, технологии, инновации: Всероссийская конференция молодых ученых. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С.131–133.

7. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Методы расчета уставок релейной защиты и автоматики // Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала: XVI научно-техническая конференция – Екатеринбург: Издательство УПУ, 2010. – С.108–109.

8. Чан Хоанг Куанг Минь. Использование критерий технической эффективности для настройки дистанционных релейных защит линий // Электроэнергетика глазами молодежи: Международная научно-техническая конференция. – Самара: Издательство СамГТУ, 2011. – Т.2. – С.42–47.

Кроме этого, различные аспекты и фрагменты диссертационной работы отражены в других 5 публикациях.